

ステレオビジョンによる移動物体の追跡

山本和弥 村井祐一 番匠一雅 野田健一

拓殖大学工学部工学研究科
〒193 東京都八王子市館町815-1
E-mail:kazuya@nm.takushoku-u.ac.jp

ステレオビジョンを用いる画像処理の応用例の一つとして、ピッチャーが投球するボールの飛跡追跡という問題がある。これは、飛行するボールを2台のテレビカメラでステレオ観測し、三角測量の原理を利用してボールの時々刻々の空間位置を精密計測するものである。本研究では、これらの処理をリアルタイムでしかも精度の高い計測を行うために、色距離法や次フレーム位置予測アルゴリズムなどを利用し、これらのアルゴリズムで必要となる各パラメータ値の最適化を行った。また、システムの精度を詳細に評価するための実験を行い、ロボット捕打球が可能となる精度を実現した。

Moving object pursuit by stereo-vision system

Kazuya Yamamoto, Yuichi Murai, Kazumasa Bansho and Ken-ichi Noda

Computer Science Dept. Faculty of Engineering Takushoku University
1, Tate-machi 815, Hachioji-shi, Tokyo, 193 Japan
E-mail:kazuya@nm.takushoku-u.ac.jp

Novel baseball region extraction algorithm in TV camera images have been installed into a stereo vision baseball trajectory searching and forecasting system which is one of the typical problems of moving particle extraction processes. A color distance concept and background scene extraction have been conveniently utilized to recognize and extract ball area in the TV images, and color continuity feature has been applied to calculate and determine ball center coordinates in the TV images. A succeeding frame forecast algorithm in ball searching process is effectively utilized to get as short searching time as the real time ball searching has become possible. Real time ball region extraction in TV images and three dimensional ball position determination have been successfully experimentally demonstrated.

1. はじめに

自然シーン中からの移動物体の発見や認識および追跡は、画像処理の分野の中でも重要な課題の一つとなっている。これらに関連する分野に、野球ボールの飛跡追跡という問題がある。これは、野球のピッチャーが投球するボールを2台のテレビカメラで観測し、その画像中からボール像の抽出と中心点決定を行い、三角測量の技術を用いてボールの三次元空間位置を計測するものである。筆者らはこれらの処理を汎用コンピュータによりリアルタイムで、しかもグラウンドの環境変化等に対してロバストなシステムを構築するため、色距離法や次フレーム位置予測などのアルゴリズムを開発し、報告を行ってきた[1]~[3]。本研究では、これらのアルゴリズムの確立と各パラメータの値の決定およびシステムの精度を評価するため、詳細な実験を行い、本システムが十分な精度を持つことを確認した。

2. システム構成

本システムの構成を図1に示す。左右にステレオ配置されたカメラ、各カメラからの映像を処理する画像処理部、各画像処理部からのデータを受け取り、三角測量の技術によりボール空間位置座標を計算する計算部、ロボットバッターやロボットキャッチャーなどの駆動部(現在は未実装)から構成される。なお、左右とはキャッチャーからピッチャー方向を見ての左右と規定する。

左右の各カメラで撮影された画像信号はA/D変換され、それぞれに接続された画像処理部に入力される。画像処理部では入力された画像からボール像抽出アルゴリズムとボール中心点決定アルゴリズムを用いてボール中心点座標を計測し、その

座標を計算部に送信する。計算部では、左右の画像処理部から送られてくるボール中心点座標から三角測量の技術を用いてボール空間位置を算出し駆動部に対して制御信号を送信する。

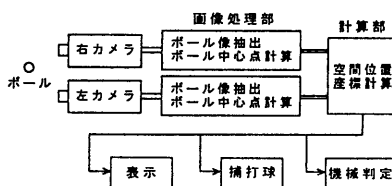
本研究では、認識する物体を野球ボールと限定しているため、以下に示す有利点を利用することが出来る。

- (1)自然シーン中においてボール像は基本的に単一色により構成されるため、ボール像抽出は撮影画像中からボール像に近似した色を抽出することにより行うことができる。
- (2)ボールの飛行中は、重力および空気との摩擦以外の力を受けないため、滑らかな飛跡を示す。そのため、ボール像の次フレームにおける計測位置をある程度予測することができる。
- (3)自然シーンに対してボール像の大きさは充分小さいため、ボール像は限られた領域内を注目するだけで検出することができる。また、ボールはピッチャーの手から投球されるため、初期探索領域はピッチャー近傍とすることができる。
- (4)ボールは、ピッチャーとキャッチャーの間を飛行するため、自然シーン中のボール像の大きさは4~20[pixel]と限られた大きさとなる。そのため、この大きさにあてはまる像のみをボール像として抽出すればよい。

したがって問題は、これらの条件を利用して自然シーン中から高速にボール像を発見し、いかに正確なボール中心点座標を得るかにかかるとなる。

3. ボール像抽出アルゴリズム

自然シーン中の移動物体を追跡するためには、その移動物体の像とそれ以外の像とをあらかじめ分離し、移動物体の部分のみを抽出する必要がある。本研究では、追跡対象となる物体を野球ボールと限定しているため、条件(1)よりピクセルの持つ色情報を用いてボール像かどうかの判断を行うことが出来る。そこで、以下にあげる3つのア



ルゴリズムを開発し、システムの高速度および高精度化を図った。以下に各アルゴリズムについて述べる。

3.1 背景除去法によるボール像の抽出

本システムのように固定したカメラを使用する場合、撮影画像内に移動物体が映ると、その物体の映っている部分の色情報は変化するが、それ以外の部分は同じ背景が映っているため色情報は変化しない。そこで、本システムでは投手がボールを投球する前の画像を背景像として記憶しておき、ボールが投球されると、その画像と背景像とを比べ、色情報が変化した部分のみを抽出する事で、移動物体であるボール像のみが残った画像を得る。これによる実験結果を7.1（自然シーン中からのボール像抽出実験）に示す。

3.2 色距離法によるボール像の抽出

本システムでは、画像信号として白黒画像ではなく、RGB各5bitのカラー画像を用いている。そこで、投手がボールを投球する前にそのボールがカメラによってRGB各値がどのような成分で撮影されるかを調べ、ボール基本色として記憶しておく。ボールが投球されると、自然シーン中の探索対象ピクセルの色とボール基本色とを比べ、色情報が近似しているピクセルのみをボール像として認識する。自然シーン中の探索対象ピクセルの色とボール基本色が近似しているかどうかの判断には、色距離を用いている。色距離とは、図2のようにボール基本色 $P_{ref}(R_{ref}, G_{ref}, B_{ref})$ と、探索対

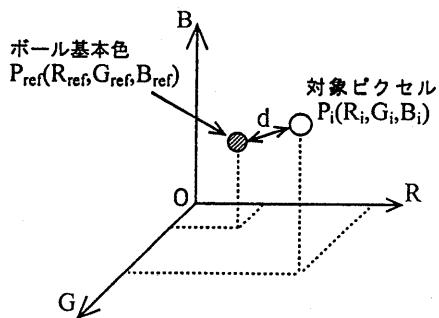


図2. 色距離法によるボール像の抽出

象ピクセルの色 $P_i(R_i, G_i, B_i)$ のRGB各値を三軸とした三次元空間上にプロットした点の两点間の距離のことである。この距離 d （現在のしきい値は60）が短くなるピクセルをボール基本色と近似していると考え、ボール像として認識する。これによる実験結果を7.1（自然シーン中からのボール像抽出実験）に示す。

3.3 背景除去法と色距離法を併用する方法

移動物体の抽出に背景除去法を用いると、背景上にある木が風で揺れた時など、ボール像以外の移動物体が撮影画像内に映った場合、その像もボール像として抽出してしまう可能性がある。また、色距離法のみを用いた方法では、撮影画像内にボール基本色と色距離がしきい値以内である物体が存在する場合、その像もボール像として抽出してしまう。そこで、背景除去法と色距離法を併用してボール像抽出を行い、ボール像以外の物体を抽出しないようにした。これにより、背景除去法と色距離法の両方の条件を満たすピクセルのみを抽出するため、個々のアルゴリズムの弱点を改善することができる。これによる実験結果を7.1（自然シーン中からのボール像抽出実験）に示す。

4. ボール中心点決定アルゴリズム

すでにボール像が抽出された画像からその中心点を決定する方法として、撮影画像内の最も明るい点を探索し、ボールの中心点座標とする方法が考えられる。しかし、この方法ではボール像より明るいノイズが混入した時は、その点をボール中心点として誤認識する。また後述する探索領域限定アルゴリズムでは、検出されたボール中心点を次フレームにおける探索領域決定の手がかりとしているため、取得される座標は少なくともボール像近傍を示している必要がある。そこで、各ピクセルを個別に評価するのではなく、撮影画像全体を総合的に評価するようなアルゴリズムを考案した。

画像内のボール中心点を決定するアルゴリズムとしてピクセルの分布の中心に注目する方法（分

布中心法)がある。また、本システムで使用する画像処理部のビデオメモリの特性上、画像の色情報取得はラスタ走査により行うのが最も効率が良い。そこで自然シーン中のボール像を構成するピクセルの横方向の連続性に注目する方法(横連続度法)も考案した。以下に個々のアルゴリズムについて述べる。

4.1 分布中心法によるボール中心点決定

移動物体が抽出された画像内におけるボール像は、ボール像を構成するピクセルの集合体であると考えることが出来る。この点に注目し、検出されたピクセルのx, yそれぞれの座標の加算を画面全体に対して行い、得られた座標の総和を、検出したピクセルの総数で割ることにより、ボール像を構成するピクセルの平均中心座標を得ることが出来る。また、ボール像は白色をしているため、その部分だけが特に階調値が高いと考えられる。そこで座標加算時にピクセルの階調値の重み付けを行うことで、ボール像以外のノイズの影響を減少させることが出来る。これによる実験結果を7.2(自然シーンにおけるボール中心点決定実験)に示す。

4.2 横連続度法によるボール中心点決定

移動物体が抽出された画像内において、ボール像は円形をしているため、ボール像を構成するピクセルが横方向にもっとも連続したラインがボール像の横方向の直径となり、その中点がボール像の中心点となる。そこで、撮影画像をラスタ走査し、ボール像となるピクセルが発見されると、引き続きラスタ走査を行いながらピクセルの横方向の連続度をカウントする。この連続度が最大となるラインをボール像の横方向の直径と考え、その中点をボールの中心点としている。ここで条件(4)より、自然シーン中におけるボール像の大きさは、ある一定の範囲に収まるため、横方向に連続していた像の大きさが、この範囲(現在は4~20[pixel])に収まっているもののみをボール像と考え、中心点決定に利用するようにした。これに

より、自然シーン中に発生するボール像と関係のないノイズを除去することが出来る。これによる実験結果を7.2(自然シーンにおけるボール中心点決定実験)に示す。

5. 探索領域を小面積化したボール像追跡

ボール像抽出アルゴリズムやボール中心点決定アルゴリズムを、自然シーン全体に対して行うと1画面の処理が1フレームの時間である33.3[ms]に間に合わず、リアルタイム処理が行えない。また、探索領域を自然シーン全体に設定してしまうと、追跡対象となるボール像以外の移動物体やノイズの影響を受けて、正確なボール中心点座標を得ることが困難になるということが、実験により判明している。本システムでは、追跡対象を野球ボールと限定しているため、条件(3)より移動物体追跡中は自然シーン中のごく一部に注目するだけでよい。そこで、ボールを探索する領域を小面積に限定し、その領域内でのみボール像抽出とボール中心点決定を行い、ボール像の移動とともにその領域も移動させるようなアルゴリズムを開発し、システムの高速度と精度の向上を図った。探索領域の小面積化によるボール中心点決定精度を測定する実験の結果を前記の7.2(自然シーンにおけるボール中心点決定実験)に示す。

5.1 ボール像追跡開始タイミングの決定

ピッチャーが投球するボールを追跡するためには、投球直後のボール像を発見する必要がある。野球ボールはピッチャーの手から投球されるため、条件(3)よりピッチャー近傍に初期ボール探索領域(待機領域)を設定することができる。領域内にボール像が発見されれば、追跡処理を開始する。ここで、後述する次フレーム位置予測アルゴリズムでは、あらかじめ2点以上のボール中心点取得されている必要がある。そこで、待機領域内でボール像が発見されると、そのボール中心点座標近傍に探索領域を新たに設定し、次フレームにおけるボール像の探索を行い、ボール中心点座標の決定を行う。これにより、2フレーム分のボール

中心点座標を取得することができれば、次フレーム位置予測アルゴリズムを用いて、追跡処理を開始する。

5.2 次フレーム位置予測アルゴリズム

ボールは、いったんピッチャーの手から離れてしまえば、飛行中は外部から力を加えることができないため、重力および空気との摩擦による偏向力が働くだけである。このため、飛行中のボールは滑らかな飛跡を示し、飛行する速度や方向が急激に変化するようなことはない。したがって、図4のように、飛行しているボール像の連続した3点a,b,cについてみると、他の物体に衝突するなどの原因により速度や方向が変化しない限り、点cは、ベクトル \vec{ab} の延長線上c'にあると考えることができる。そこで、5.1で述べた方法により投球の初期段階における連続した2点a,bの位置を取得することができれば、探索領域を予測点c'の近傍のみと小面積に限定し、ボール像の抽出と中心点決定を行う。この領域内でボール中心点が得られれば、その点と1フレーム前のボール中心点とを使って、次フレームのボール位置を予測し、探索領域を決定する。この方法を用いると、ボールのスピードが速くても次フレームのボール存在位置の予測さえ正確に行うことができれば、ボールを見失うことがなくなり、正確に追跡を行うことができる。以上の処理により、探索領域を $50 \times 50[\text{pixe}^2]$ としたとき、1フレームの画像に対する処理時間が約7.5[ms]（全画面を探索対象とした時の約1/30）となり、リアルタイム処理が可能となった。

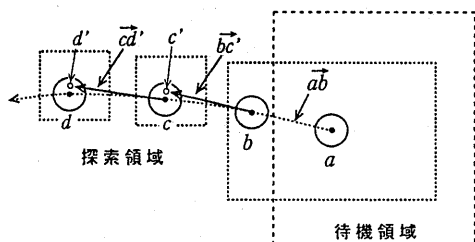


図4. 次フレーム位置予測

6. 実空間座標への変換のための基準点設定

本システムでは、ボールの実空間座標の計測はステレオビジョンを利用した三角測量により行っている。三角測量で精度の高い測定を行うためには、2台のテレビカメラの位置や視角方向を正確に定める必要がある。この時、テレビカメラの位置を正確に設定するのは比較的容易であるが、カメラの視角方向を正確に設定するのは困難である。そこで、撮影フィールド上に、空間座標が既知または正確に計測可能な点を複数設置し、撮影された自然シーン内に映し出されたそれらの点を基準参照点として、飛行しているボール像との相対位置関係よりボールの三次元空間座標の計算を行う。この方法によりボール中心点座標の計測後に基準点を使いカメラ角度の補正を行うことが出来るため、必要以上にカメラの視覚方向に対する角度のずれを意識する必要がなくなる。

三角測量を用いてボールの空間位置を取得するには2台のテレビカメラ間を通る直線とカメラとボール中心点を通る直線との角度を取得しなければならない。図5は、テレビカメラに映し出される撮影シーンである。図5に示すように撮影フィールド内のピッチャープレート上に1点、ホームベース上に2点の基準点を設け、その位置に基準点測定器を設置し、2台のテレビカメラで撮影を行う。左右のテレビカメラに映し出された、a,b,c点それぞれの基準点のx,y座標を記録しておき、基準点の撮影時と同じカメラ位置で撮影された投球シーンからボール像のx,y座標を取得する。三角測量に必要なボール座標に対する角度を取得す

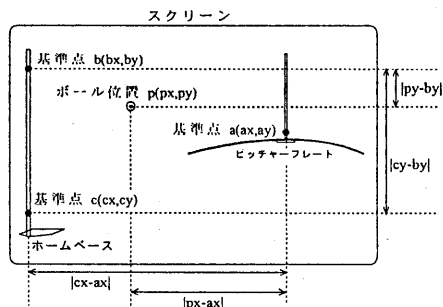


図5. 撮影フィールド図

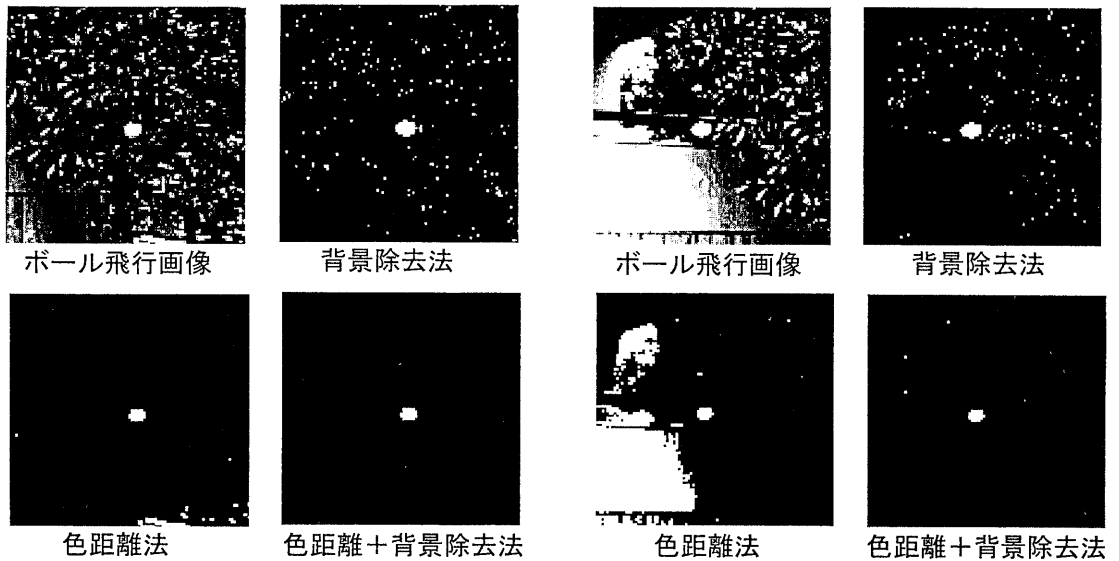


図6. ボール抽出実験の結果

るには、x軸方向の角度は図5に示す $|px-ax|$ と $|cx-ax|$ 、またy軸方向は $|py-by|$ と $|cy-by|$ の相対座標位置関係より求めることができる。この方法による既知な点の実空間座標への変換実験の結果を7.3（実空間座標への変換実験）に示す。

7. 実験

本システムを用いて、60枚の自然シーン中よりボール像の抽出とボール中心点の決定を行う実験を行った。また三角測量によるボールの実空間座標の計算を行う実験も行った。以下に実験結果を示す。

7.1 自然シーン中からのボール像抽出実験

自然シーン中より、ボール像の抽出精度を計る実験を行った。自然シーン中から背景除去法、色距離法、背景除去と色距離を併用する方法の3つのアルゴリズムによりボール像の抽出を行った。各自然シーンに対する実験結果を図6に示す。図6より、背景除去法や色距離法のみではボール像を完全に抽出できない自然シーンに対しても、背景

除去法と色距離法を併用することにより、ボール像のみを正確に抽出できることがわかる。

7.2 自然シーンにおけるボール中心点決定実験

ボール像が抽出された画像より、中心点を決定する実験を行った。背景除去法、色距離法、色距離+背景除去法の3種類のアルゴリズムによりボール像が抽出された画像に対して、それぞれ分布中心法、横連続度法を用いて中心点決定を行った。また、探索領域の面積はそれぞれ 50×50 、 100×100 、 150×150 、 200×200 [pixel²]とした。実験結果を図7に示す。これは本システムにより計測されたボール中心点と、その画像を人間が見て判断したボール中心点とのrms誤差をまとめたものである。

分布中心法は、探索領域の拡大に比例して精度が低下している。これは、探索領域の拡大に比例してノイズが混入する確率が高くなり、中心点決定精度に影響を与えるためである。横連続度法に関しては、背景除去を行うと探索領域の拡大に対しても精度の低下が少ない。これは、領域内に混

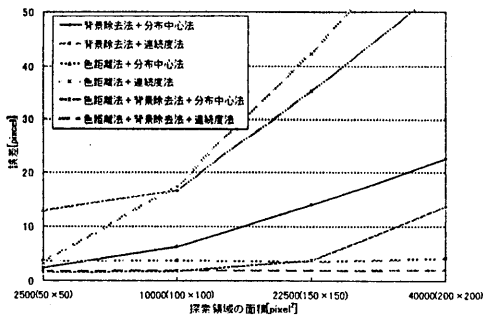


図7. ボール中心点決定実験の結果

入するノイズの大きさが条件(4) (ボール像の大きさは4~20[pixel])に合わず、横連続度法による中心点決定精度に影響を与えないためであると考えられる。

図7より、各アルゴリズムの組み合わせの中では、色距離+背景除去法と横連続度法の組み合わせがもっとも精度が高く、そのrms誤差は約1.5[pixel]であった。1ピクセルの実空間上での大きさは約4~8[mm]であるので、この誤差は実空間上では約6~12[mm]の誤差に相当する。

7.3 実空間座標への変換実験

左右のカメラから得られたボール中心点座標からボールの三次元空間座標を求める際の精度を測定する実験を行った。この実験では地面から高さ2000[mm]、1500[mm]、1000[mm]および500[mm]の位置にマークをつけた基準点測定器を、ピッチャープレートからホームベースを結ぶ直線上に1000[mm]間隔で配置し、そのマーク位置を本システムにより測定し、理想値との比較を行った。実験の結果、理想値とのrms誤差の平均はx軸方向では約7[mm]、y軸方向では約19[mm]程度であった。この誤差と、自然シーンにおけるボール中心点座標決定の際に発生する誤差とを考慮すると、本システムにおけるボールの実空間座標への変換におけるrms誤差は、x軸方向では約16[mm]、y軸方向では約28[mm]程度であると考えられる。野球ボールの大きさが約71[mm]であることから、本システムの精度はロボット捕打球に対しては、

実用レベルにあるといえる。

8. むすび

ステレオ配置されたテレビカメラにより撮影された自然シーン中よりボール像を抽出し、その中心点の決定を行った。色距離と背景除去を併用するボール像抽出アルゴリズムと、横連続度法による中心点決定アルゴリズムによってrms誤差が1.5[pixel]の精度を得た。また次フレーム位置予測による探索領域の限定により、処理時間が全画面を探索対象とするときに比べて約1/30 (7.5[ms])となり、リアルタイム処理を可能とした。また、左右のボール中心点座標よりステレオビジョンを利用した三角測量によるボールの空間位置座標を計測するシステムを構築し、シミュレーションと実験により、rms誤差がx軸方向では約16[mm]、y軸方向では約28[mm]程度であることがわかった。この値は、ロボット捕打球の実現の可能性が期待できるレベルにあるといえる。

【参考文献】

- [1] 村井,番匠,山本,野田:"野球ボールの追跡と到達点の予測",情処学会研究報告,95-CV-95, pp1-8,1995
- [2] 番匠,村井,山本,野田:"適応的関数切り替えによる野球ボール到達点の予測",情処学会研究報告,95-CV-97-2,pp7-13,1995
- [3]村井,番匠,山本,野田:"投球された野球ボールの自然シーン中からの抽出と追跡",情処学会論文誌, Vol.37, No1, pp.163-166, 1996.
- [4] R.G.ワッツ, A.T.ベイヒル:ベースボールの科学.サイエンス社, 1993.